

二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件研究*

武志翔^{1)2)†} 李新羽³⁾ 黄宇文¹⁾ 邹依洋¹⁾
熊亮¹⁾ 邓琥¹⁾²⁾ 尚丽平¹⁾²⁾

1) (西南科技大学信息工程学院, 绵阳 621010)

2) (西南科技大学, 极端条件物质特性联合实验室, 绵阳 621010)

3) (西南科技大学制造科学与工程学院, 绵阳 621010)

(2024年1月26日收到; 2024年2月26日收到修改稿)

具有远场超分辨聚焦特性、消色差、小尺寸和易加工的光学聚焦器件在光学成像、光学显微和光刻等领域具有巨大应用潜力. 本文提出了一种基于光学超振荡基本原理, 结合角谱衍射理论和二进制粒子群算法的二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计方法. 为了验证所提出设计方法, 首先针对波长 $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 的径向偏振光对二值振幅型远场超分辨聚焦器件振幅进行优化设计, 再对三者振幅分布进行逻辑“与”操作, 使其同时含有3个工作波长远场超分辨聚焦的振幅分布信息. 仿真结果表明: 在3个波长入射条件下相应的峰值半高全宽分别为 $0.441\lambda_1$ (0.179 μm), $0.469\lambda_2$ (0.249 μm) 和 $0.427\lambda_3$ (0.270 μm), 低于阿贝衍射极限, 实现了远场超分辨消色差聚焦, 且同时聚焦较小的旁瓣比率 (<15%). 此类器件具有易加工、消色差和超分辨等优点, 适用于光学系统微型化、集成化. 所提出的设计方法可拓展至其他光学波段, 并为相关光学研究领域提供核心聚焦器件.

关键词: 光学超振荡, 消色差, 远场超分辨, 角谱衍射**PACS:** 42.25.-p, 42.79.-e, 07.60.-j, 78.67.Pt**DOI:** 10.7498/aps.73.20240176

1 引言

传统光学聚焦器件受到阿贝衍射极限 $0.5\lambda/\text{NA}$ (λ 为照明波长, NA 为数值孔径) 的限制, 严重影响了光学显微和成像系统的空间分辨率^[1]. 由于构成聚焦器件的材料色散效应, 光学聚焦器件存在色差, 在许多光学研究应用中, 如超快光学中的脉冲整形^[2]、光纤通信中光脉冲的传输^[3] 和消色差光学成像^[4] 等, 精确控制光学器件的色散效应至关重要^[5]. 色差和衍射受限是高性能聚焦和成像面临的两大挑战.

传统消色差手段主要采用多种材料的组合镜头, 存在体积大、质量重和不易集成等问题, 这极大地制约了光学显微和成像系统的微型化和集成化快速发展进程. Chen 等^[6] 基于等光程原理提出了一种消色差聚焦器件设计方法, 将聚焦器件所需要的相位分成相位延时、群延时和群延时色散3个部分, 采用光学超表面实现消色差相位空间排布, 在 470—670 nm 波长范围内实现了消色差聚焦. 与上述原理相似, Arbabi 等^[7] 在红外波段采用无定型硅光学超表面, 通过合理排布基本调控单元实现相位和色散的精确调控, 设计了一个反射型光学聚焦器件, 在波长 1450—1590 nm 范围内实现消

* 国家自然科学基金 (批准号: 62105271)、四川省科技厅支撑计划 (批准号: 2020YJ0160)、西安近代化工研究所开放基金 (批准号: SYJJ20210411) 和西南科技大学博士基金项目 (批准号: 19zx7160) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zwxu@swust.edu.cn

色差聚焦. Wang 等^[8]提出了一种消色差聚焦器件设计方法, 在波长 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ 范围内, 将基于等光程原理的相位分布分成 $\varphi(R, \lambda_{\max})$ 和 $\Delta\varphi(R, \lambda)$, 通过合理设计基本调控单元满足两部分所需求的相位空间分布, 在波长范围 1200—1680 nm 内实现了数值孔径 0.268 的消色差聚焦器件设计. 上述消色差聚焦器件均存在衍射受限的问题; 另外, 由于较大群延时需要更高的基本调控单元高度来满足, 微纳结构的较高深宽比增加了器件加工难度; 此类消色差器件数值孔径增大依赖于更高的群延时, 这也限制了其数值孔径进一步增大.

对于光学成像、光刻而言, 另外一个重要挑战是衍射受限问题. 近年来, 研究人员在光学超分辨聚焦研究方面开展了大量研究, 形成了多种技术途径实现超分辨聚焦, 主要有光瞳滤波聚焦法^[9,10]、表面等离激元聚焦法^[11,12]和负折射率超透镜聚焦法^[13]等. 然而研究结果表明^[14], 上述聚焦方法无法在线性、平移不变和远场光学系统中从根本上改善光学系统的分辨率, 因此需要寻找新方法和新技术突破衍射极限.

光学超振荡^[15-18], 利用低空间频率的谐波分量实现局部空间频率快速振荡, 其振荡频率大于最高谐波频率; 该物理过程看作是一系列具有不同复振幅平面波, 通过对这些平面波进行精细调节, 可构建携带光学截止频率之外的亚波长聚焦光场. 2019年, Qian 等^[19]采用亚波长尺寸的金属超分子 (metamolecules), 基于光学超振荡原理设计了一个大数值孔径 (1.52) 的聚焦器件, 所产生的聚焦焦斑尺寸为 0.33λ , 实现了远场超分辨聚焦. 同年, Zhuang 等^[20]针对波长 532 nm 的径向偏振光, 设计并优化了一组具有双折射效应的 TiO_2 超原子单元, 通过优化算法设计了一种单层超透镜, 实现了聚焦半宽为 0.429λ 的远场超分辨聚焦, 聚焦效率 17.2%. 2020年, Kim 和 Rogers^[21]采用二值振幅型金属超振荡透镜结合同心亚波长狭缝, 设计了一种纵向偏振聚焦的超透镜, 仿真结果表明聚焦焦斑尺寸为 0.24λ , 突破衍射极限, 聚焦焦斑旁瓣比率较大. 2022年, Wu 等^[22]针对太赫兹频段 λ 为 2500 μm , 设计了一组具有双折射效应的超原子单元, 在 $0-2\pi$ 范围内实现 8 值相位调控; 在线偏振光入射条件下, 实现了远场超分辨聚焦, 焦斑峰值半高全宽在 $0.418\lambda-0.556\lambda$ 之间, 同时旁瓣比率在 14.3%—16.2% 之间, 工作带宽为 1900—

2700 μm .

为了在实现远场超分辨聚焦的同时, 又能实现消色差聚焦, 研究人员在宽带超振荡聚焦器件^[23]、多波长超振荡聚焦器件^[24,25]开展了相关研究. 通过设置复杂的适应度函数, 经过优化算法迭代运算, 获得了 405, 532 和 633 nm 入射条件的超分辨聚焦焦斑^[25], 该方法依赖于复杂的适应度函数, 且焦斑周围存在较大旁瓣. Tang 等^[26]采用 TiO_2 超表面对入射光场进行调控, 针对波长 473, 532 和 632.8 nm 的入射光, 采用遗传算法结合多目标优化模型设计了消色差超振荡透镜, 仿真结果表明所设计器件能够实现焦斑尺寸为 0.706, 0.722 和 0.750 倍衍射极限的聚焦, 该设计方案同样依赖于多参数的复杂优化模型, 同时存在计算耗时长等问题.

本文针对传统聚焦器件高性能聚焦和成像面临的衍射受限和色差两大难题, 提出了一种二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计方法. 该方法主要基于光学超振荡基本原理, 结合角谱衍射理论和二进制粒子群算法, 对远场超分辨聚焦器件的二值振幅空间分布进行优化. 先进行单波长器件振幅优化设计, 再对多个工作波长器件振幅分布进行逻辑“与”操作, 所形成的器件同时包含多个工作波长远场超分辨聚焦的振幅分布信息, 进而实现消色差聚焦. 为了验证所提出的设计方法, 本文针对波长 $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 的径向偏振光进行了大数值孔径 ($\text{NA} = 0.97$) 二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计, 并采用数值仿真对其聚焦特性进行验证, 结果表明该器件实现了远场超分辨消色差聚焦.

2 设计方法与理论计算结果

2.1 设计方法

图 1 给出了二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件示意图, 入射光为径向偏振光, 从基底一侧入射, 采用二值振幅调控方式分别设计了 $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 三个波长入射条件下远场超分辨聚焦器件 S-SOL₁, S-SOL₂ 和 S-SOL₃, 由一系列同心圆环结构构成; 所设计透镜具有相同的结构尺寸 (半径 R_{lens} 和最小调控单元周期 P) 和焦距 f ; 对 3 个聚焦器件的二值振幅进行逻辑“与”操作获得远场超分辨消色差聚焦器件 A-SOL.

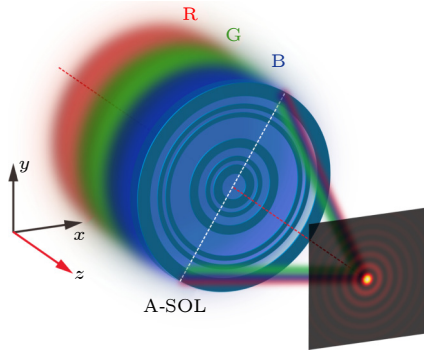


图 1 二值振幅型远场超分辨消色差聚焦示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the binary-amplitude achromatic super-oscillatory lens (A-SOL).

本文采用具有拉盖尔-高斯的复振幅分布的径向偏振光作为入射光场^[27]. (1) 式给出了其具体的复振幅公式描述, 其中 E_0 为电场的振幅, r 是径向位置, $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢, $w_0 = (\lambda z_0/\pi)^{1/2}$ 为高斯光束的光腰, $w(z) = w_0[1 + (z/z_0)^2]^{1/2}$ 为 z 处的光腰, z_0 为瑞利距离, $R(z) = z[1 + (z_0/z)^2]$ 为曲率半径.

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)^2} r \exp\left[\frac{-r^2}{w(z)^2}\right] \times \exp\left\{j\left[kz + \frac{kr^2}{2R(z)} - 2 \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]\right\}. \quad (1)$$

径向偏振光强度和相位分布如图 2 所示, 图 2(a)—(c) 分别给出了 405, 532 和 632.8 nm 的

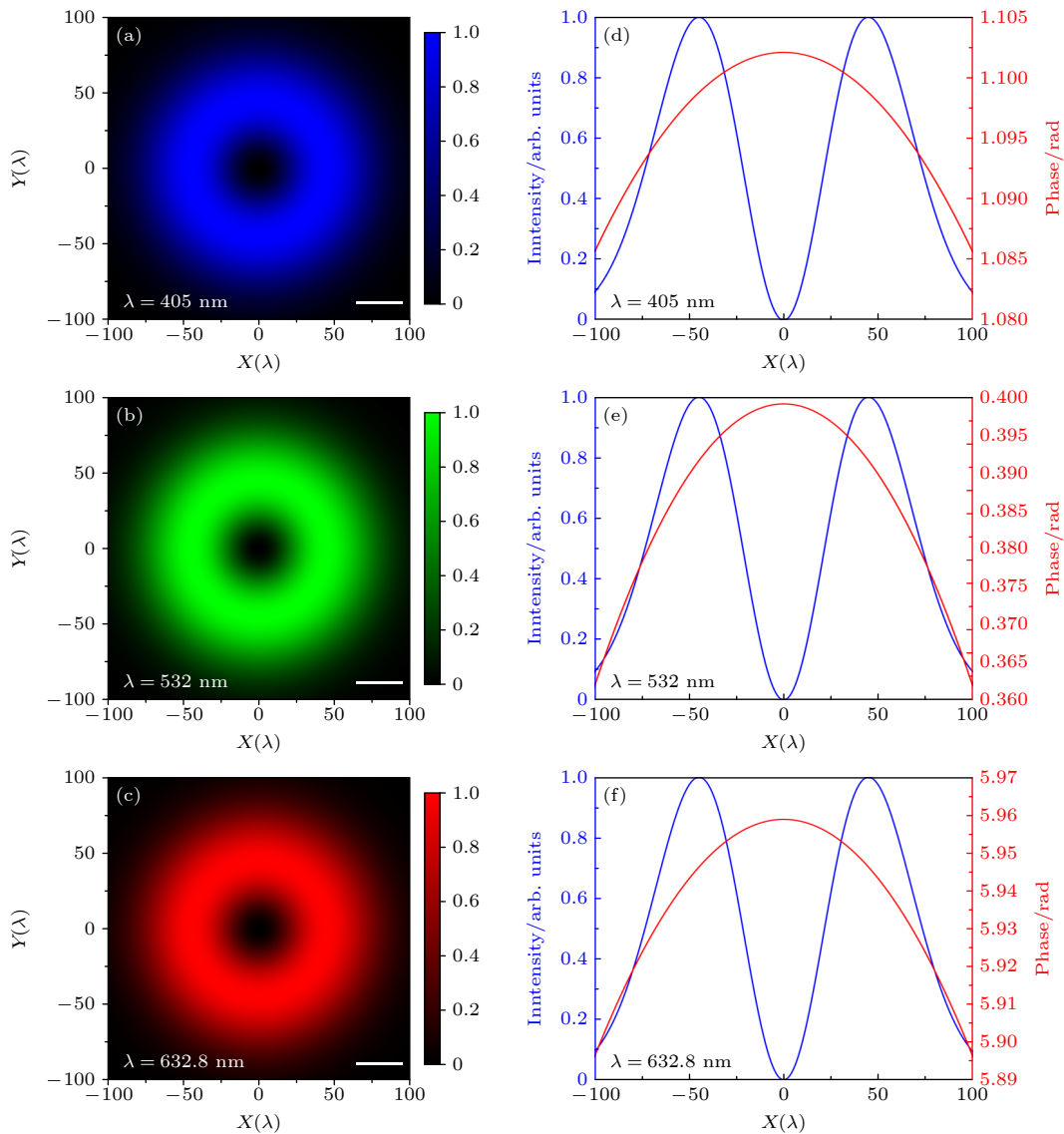


图 2 径向偏振光光场强度、相位分布 (a)—(c) 405, 532 和 632.8 nm 的光场强度分布; (d)—(f) 沿半径方向上的光场强度和相位分布

Fig. 2. Intensity and phase distribution of radially polarized beam: (a)–(c) Optical field intensity distributions of 405, 532 and 632.8 nm, respectively; (d)–(f) the corresponding optical field intensity and phase distributions along the radial direction through the center of the optical field.

光场强度分布, 其中 $w_0 = 40 \mu\text{m}$, 距离 $z = 200 \mu\text{m}$, 光场强度呈现“甜点圈”形状分布. 图 2(d)–(f) 给出了沿半径方向上 $[-100\lambda, 100\lambda]$ 的光场强度和相位分布, 其中 $\lambda = \lambda_3 = 632.8 \text{ nm}$, 峰-峰距离为 $56.534 \mu\text{m}$, 相位范围分别在 $[1.086 \text{ rad}, 1.102 \text{ rad}]$, $[0.346 \text{ rad}, 0.399 \text{ rad}]$ 和 $[5.896 \text{ rad}, 5.959 \text{ rad}]$, 在器件设计过程中需要根据相应振幅和相位进行优化.

二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计方法如图 3 所示. 首先设定聚焦器件的主要参数, 包括入射波长 λ 、器件半径 R_{lens} 和焦距 f 等. 进一步设定入射光场为径向偏振光, 其振幅和相位如 (1) 式描述. 设置聚焦器件类型为二值振幅型 (振幅透过率 $A_i = 0$ 或 1). 通过二进制粒子群算法结合角谱衍射理论优化单波长 $\lambda_1 = 405 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 632.8 \text{ nm}$ 超振荡聚焦器件, 若满足适应度函数条件要求, 即获得相应入射波长下聚焦器件二值振幅分布. 设计过程中所采用的二进制粒子群算法中学习因子 (个体认知和社会经验) 均设定为 2.0, 权重因子设定为 0.4, 粒子更新速度最大值和最小值分别为 6.0 和 -6.0, 迭代次数 50000. 对优化得到的 3 个波长二值振幅分布进行逻辑

“与”操作, 最终获得同时含有 3 个入射波长消色差聚焦的二值振幅分布信息.

采用上述方法优化后的 S-SOL₁, S-SOL₂, S-SOL₃ 和 A-SOL 振幅分布如图 4 所示, 聚焦器件共有 $2R_{\text{lens}}/P = 211$ 个同心圆环构成, 每个环带所对应的振幅透过率为 A_i . 蓝色柱状图对应位置的振幅透过率 $A_i = 1$. S-SOL₁, S-SOL₂, S-SOL₃ 和 A-SOL 所对应的振幅透过率 $A_i = 1$ 的数目分别为 102, 101, 108 和 24 个. 与单波长聚焦器件相比, 消色差聚焦器件具有较少的振幅透过率为 1 的同心圆环环带.

2.2 理论计算

在完成二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计的基础上, 本文采用角谱衍射理论对其聚焦光场进行了理论计算, 如 (2) 式所示^[28], 其中入射光场为 $U(x, y, 0)$, $A(\alpha/\lambda, \beta/\lambda, 0)$ 和 $A(\alpha/\lambda, \beta/\lambda, z)$ 分别为在入射位置和距离 z 处的角谱, α 和 β 为 x 和 y 方向上的方向余弦. 通过一次傅里叶变换 (Fourier-transform, FFT) 和一次傅里叶逆变换 (inverse Fourier-transform, IFFT) 可以完成一次衍射计算.

$$\begin{cases} A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U(x, y, 0) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy, \\ A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z\right) = A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda}\sqrt{1 - (\alpha^2 + \beta^2)}z\right], \\ U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z\right) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda}. \end{cases} \quad (2)$$

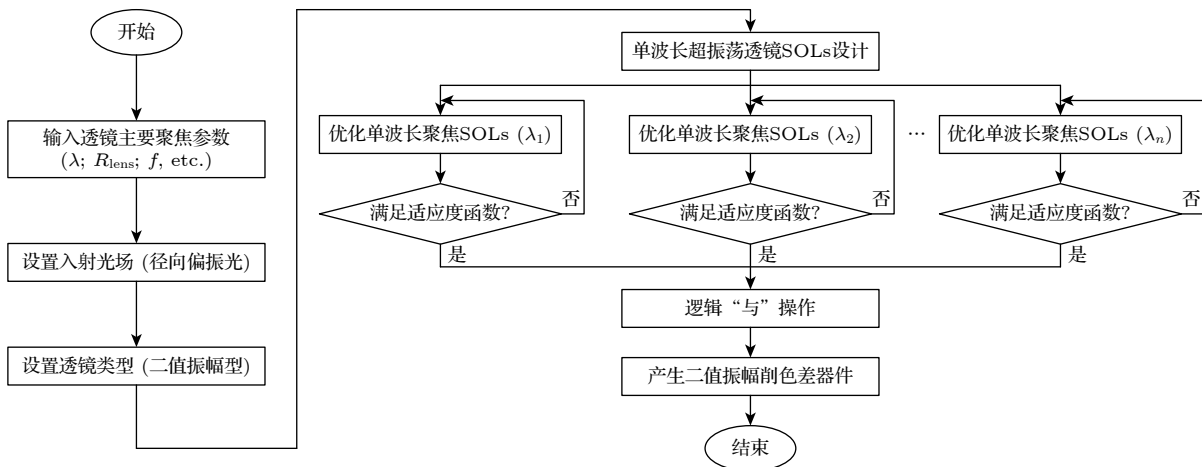


图 3 二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计方法

Fig. 3. Design method of binary-amplitude achromatic super-oscillatory lens (BP-ASOL).

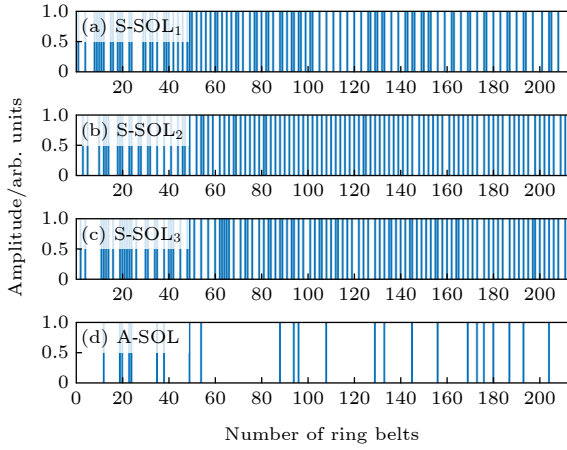


图4 二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件振幅分布 (a)–(c) 单波长超振荡透镜振幅分布; (d) 消色差超振荡透镜振幅分布

Fig. 4. Optimized amplitude distributions of super-oscillatory lens (SOLs): (a)–(c) Amplitude distributions of S-SOL₁, S-SOL₂ and S-SOL₃; (d) amplitude distribution of A-SOL.

图 5(a) 给出了二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件在 $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 入射条件下传播平面上 $z_0 = 20\lambda$ 到 $z_{\text{end}} = 30\lambda$ 范围内的光场强度分布, 采样间隔为 0.1λ ; 在设计焦距 25λ ($\lambda = 632.8$ nm) 处均产生了较为明亮的聚焦焦斑, 周围存在一些强度稍弱的旁瓣. 光轴截线光场强度归一化对比结果如图 5(b) 所示, 焦斑峰值位置分别为 24.894λ , 24.948λ 和 25.210λ , 与理论设定位置吻合, 实现消色差聚焦. 图 5(c) 给出了半高全宽 FWHM 沿传播方向上的分布, 在焦距位置附近 $[24.5\lambda, 25.5\lambda]$ 范围内 (图中阴影区域), 低于阿贝衍射极限 (diffraction limit, DL), 略高

于超振荡判据 (super-oscillation criteria, SOC)^[29]; 在焦距位置处的峰值半高全宽 FWHM 分别为 $0.462\lambda_1$ ($0.187 \mu\text{m}$), $0.468\lambda_2$ ($0.249 \mu\text{m}$) 和 $0.429\lambda_3$ ($0.271 \mu\text{m}$), 相应阿贝衍射极限分别为 $0.515\lambda_1$, $0.515\lambda_2$ 和 $0.516\lambda_3$, 均低于阿贝衍射极限, 实现了远场超分辨聚焦. 旁瓣比率沿传播方向上的分布如图 5(d) 所示, 在焦距位置的旁瓣比率分别为 10.3%, 11.59% 和 13.4%, 均处于较低水平.

3 仿真结果分析与讨论

为了验证二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计方法的可行性和正确性, 通过多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 对设计器件进行建模仿真. 由于径向偏振光振幅分布、偏振分布呈现完美轴对称性, 采用 1 维轴对称模型对器件进行建模. 在仿真模型中设定半径方向和传播方向边界条件为散射边界条件. 径向偏振光光学参量与设计参数保持一致, 从基底一侧入射. 选用 SiO_2 作为基底, 在 $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 三个波长下折射率分别为 1.4696, 1.4607 和 1.4570^[30]. 采用铝膜作为二值振幅调控材料, 透光环带对应振幅透过率为 1, 不透光环带对应振幅透过率为 0, 对应折射率分别为 $0.47947 + 4.7724i$, $0.9017 + 6.2092i$ 和 $1.2685 + 7.2840i$ ^[31]; 根据光波在金属铝膜中的趋肤深度, 以及后续器件加工工艺要求, 确定铝膜厚度 100 nm. 网格剖分区域将空气介质最大单元大小剖分为 0.1λ , 最小单元大小为 0.05λ , 最大单元增长率为 1.3. 采用频域求解器对仿真模型

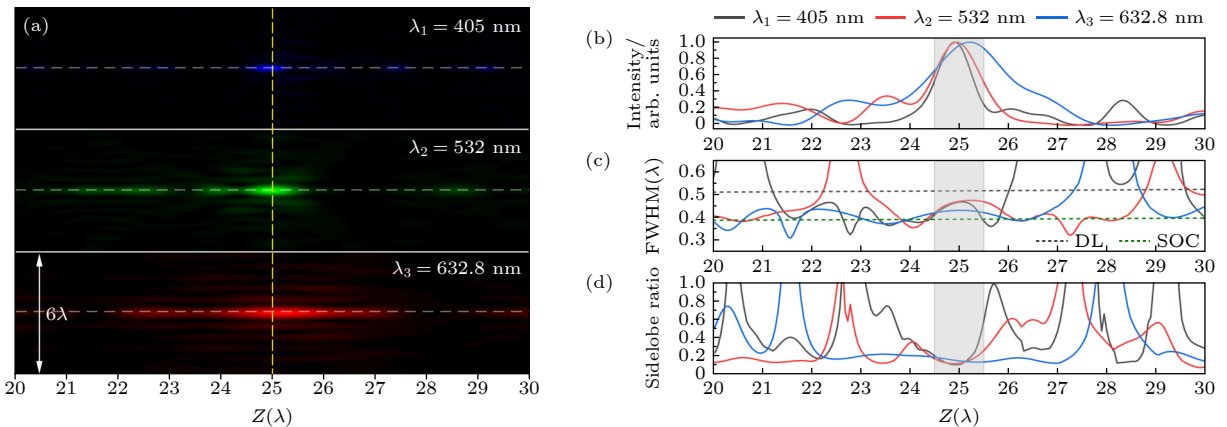


图5 (a) $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 入射条件下传播平面上的光场强度分布; (b)–(d) 沿传播方向上峰值强度、半高全宽和旁瓣比率分布

Fig. 5. (a) Distribution of optical field intensity on the propagation plane at $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm and $\lambda_3 = 632.8$ nm incidence; (b)–(d) distribution of peak intensity, FWHM and sidelobe ratio along the propagation direction.

进行求解, 求解频率分别为 7.407×10^{14} Hz, 5.639×10^{14} Hz 和 4.741×10^{14} Hz. 图 6(a) 给出了 $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 入射条件下在沿传播平面上的光场强度分布的数值仿真结果, 结果表明在设计焦距 25λ ($15.82 \mu\text{m}$) 附近产生了聚焦焦斑, 在焦斑周围出现了一些强度稍弱的旁瓣; 焦斑位置分别出现在 25.105λ , 25.106λ 和 25.105λ , 与理论计算结果吻合.

图 6(b) 给出了通过焦斑中心沿半径方向上光场强度, 其中实线为数值仿真曲线, 黑色虚线为理论计算结果; 峰值半高全宽分别为 $0.441\lambda_1$ ($0.179 \mu\text{m}$), $0.469\lambda_2$ ($0.249 \mu\text{m}$), 以及 $0.427\lambda_3$ ($0.270 \mu\text{m}$), 与理论计算结果 $0.462\lambda_1$ ($0.187 \mu\text{m}$), $0.468\lambda_2$ ($0.249 \mu\text{m}$) 和 $0.429\lambda_3$ ($0.271 \mu\text{m}$) 基本一致; 旁瓣比率分别为 12.5%, 12.6% 和 14.2%. 按照文献 [32, 33] 关于聚焦效率的定义, 对本文所设计器件聚焦效率进行计算, 结果表明 3 个波长入射情况下聚焦效率分别为 14.4%, 18.6% 和 26.7%. 数值仿真结果表明, 所设计二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件, 在远场实现了低于阿贝衍射极限的超分辨聚焦焦斑, 且同时具有消色差聚焦特性.

为了进一步深入研究在 $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 入射条件下的远场超分辨聚焦特性, 图 7(a)–(c) 分别为焦平面上的光场强度分布仿真结果, 均产生明亮聚焦焦斑, 图中白色标尺长度为 $1 \mu\text{m}$. 通过焦斑中心沿半径方向上的径向偏振分量强度 I_r (蓝色点图)、角向偏振分量强度 I_ϕ (蓝色点-线图)、纵向电场分量强度 I_z (蓝色短划线图)、总强度 I_{total} (蓝色实线图)、径向电场分量相位 Phase_r (红色实线图) 和纵向电场分量相位 Phase_z (红色短划线图) 如图 7(d)–(f) 所示. 在 3 个波长入射下, 径向偏振分量强度为空心环状分布, 主要贡献于聚焦焦斑的第 1 个极小值强度, 对主峰值强度贡献度为零; 角向偏振分量强度为零, 对聚焦光场无贡献; 纵向电场分量占据了聚焦焦斑的主要成分, 最大旁瓣的强度同样来源于纵向电场分量, 这与理论预测结果一致 [34]. 纵向电场分量相位分布曲线显示在相应的零点位置出现了相位突变, 这种相位快速振荡的现象常常作为光学超振荡的一种标志 [35]. 相比于传统透镜, 该器件在焦平面上所形成的超振荡区域可聚焦成更小的焦斑, 这也是能实现远场超分辨聚焦的主要原因.

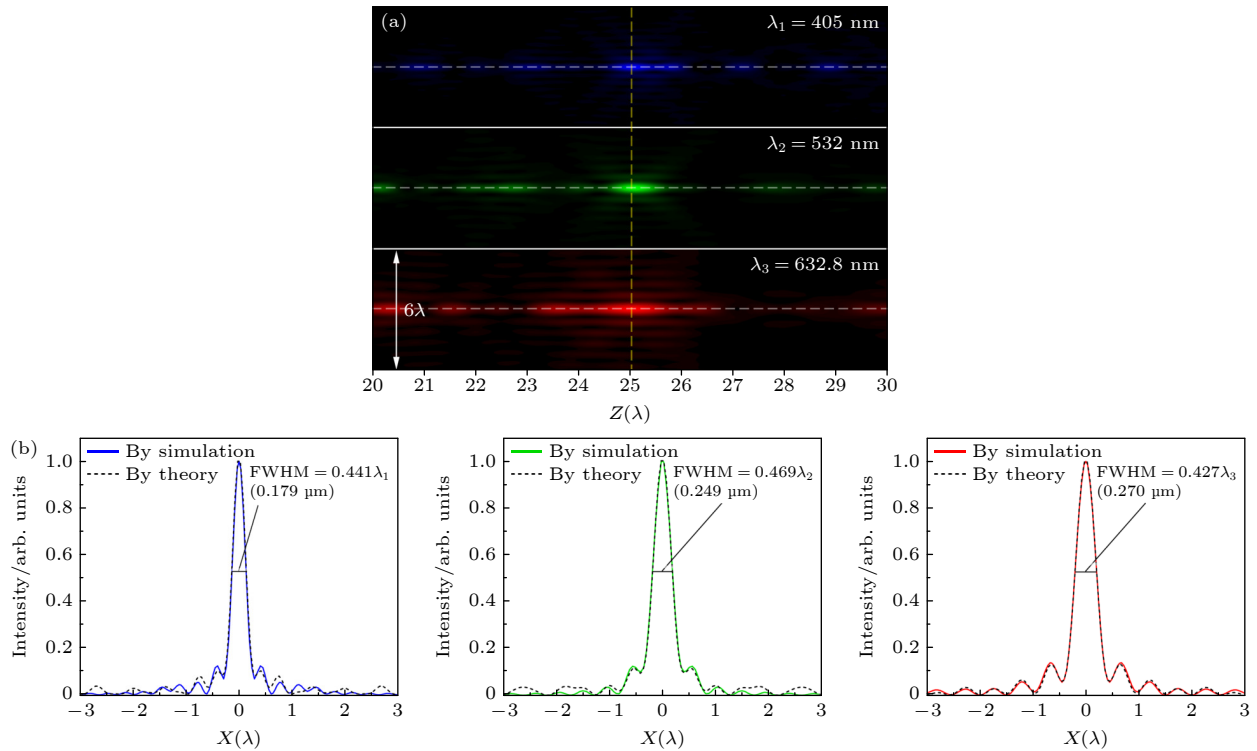


图 6 (a) $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 入射条件下传播平面上和焦平面上的归一化光场强度分布仿真结果; (b) 通过焦斑中心沿半径方向上的光场强度分布

Fig. 6. (a) Normalized distributions of optical field intensity on the propagation plane and the focal plane at $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm and $\lambda_3 = 632.8$ nm incidence; (b) intensity profiles along the radial direction across the center of the focal spot.

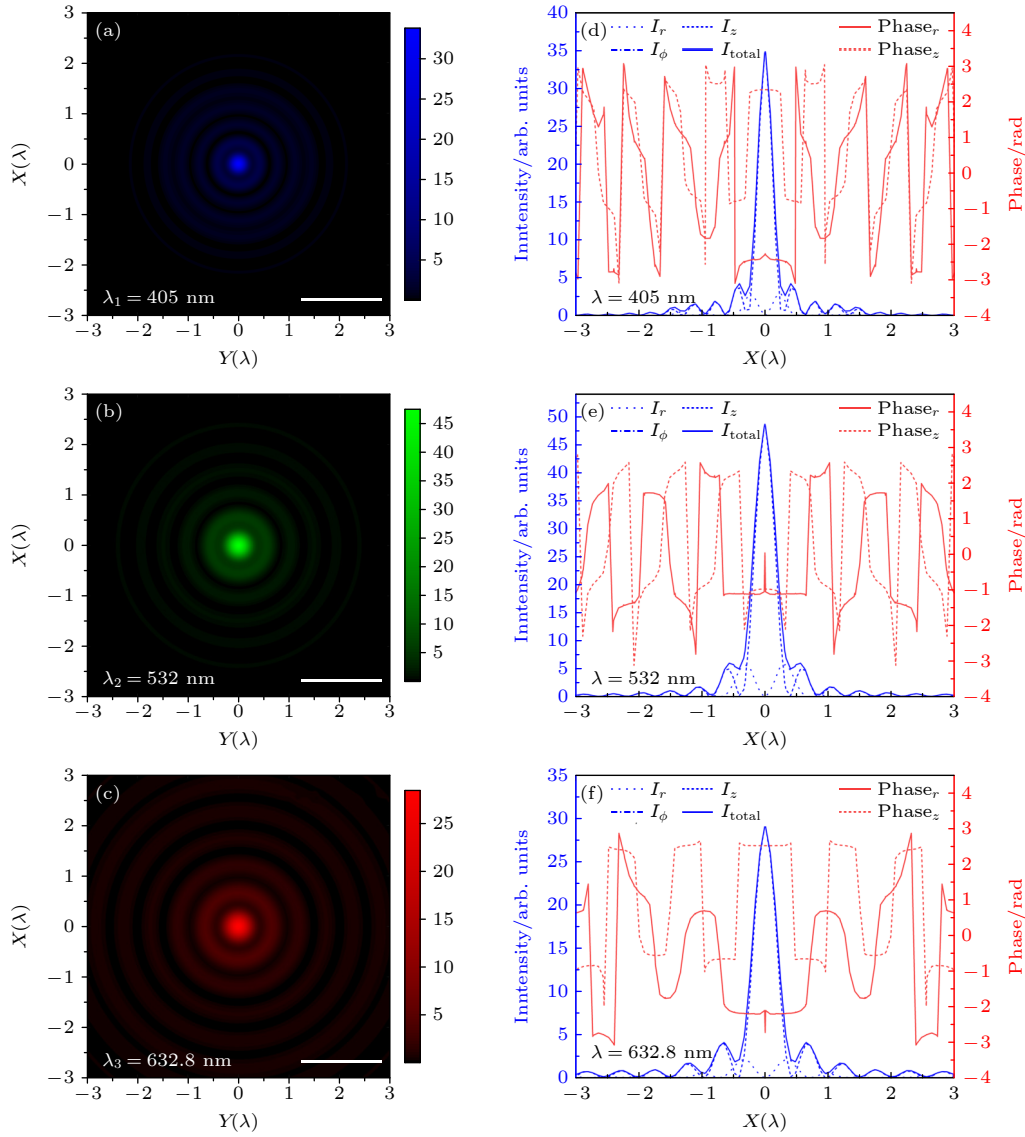


图 7 (a)–(c) $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm 和 $\lambda_3 = 632.8$ nm 入射条件下焦平面上的光场强度分布仿真结果; (d)–(f) 沿半径方向上不同分量的光场强度分布和相位分布

Fig. 7. (a)–(c) Distributions of optical field intensity on the propagation plane and the focal plane at $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm and $\lambda_3 = 632.8$ nm incidence; (d)–(f) intensity profiles and phase profiles along the radial direction.

表 1 二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件理论计算和数值仿真对比结果

Table 1. Comparison of theoretical calculation and numerical simulation results of binary amplitude-type achromatic SOLs.

关键参数	$\lambda_1 = 405$ nm		$\lambda_2 = 532$ nm		$\lambda_3 = 632.8$ nm	
	理论	仿真	理论	仿真	理论	仿真
焦距/ λ	24.894	25.105	24.948	25.106	25.211	25.105
数值孔径	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970
峰值半高全宽	$0.462\lambda_1$	$0.441\lambda_1$	$0.468\lambda_2$	$0.469\lambda_2$	$0.429\lambda_3$	$0.427\lambda_3$
旁瓣比率	10.3%	12.5%	11.6%	12.6%	13.4%	14.2%
阿贝衍射极限	$0.515\lambda_1$	$0.516\lambda_1$	$0.515\lambda_2$	$0.516\lambda_2$	$0.516\lambda_3$	$0.516\lambda_3$

表 1 给出了所设计二值振幅型超分辨消色差聚焦透镜的理论计算和数值仿真结果关键参数对比. 对比结果表明: 在焦斑位置、峰值半高全宽和旁瓣比率等具有较好的一致性; 二者之间存在着一

些细微差别, 这主要归因于设计过程仅仅考虑理想状况下的二值振幅调控, 并未考虑实际实现过程中相邻环带之间存在的耦合作用, 另外仿真过程中网格剖分及散射边界条件的设置等因素.

4 结 论

面向传统聚焦器件面临着衍射受限和色差两大难题, 本文提出了一种基于光学超振荡基本原理, 结合角谱衍射理论和二进制粒子群智能优化算法的二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件的设计方法. 该方法主要分成两个步骤: 1) 首先对单个波长器件二值振幅型远场超分辨聚焦器件振幅优化, 获得相应波长振幅分布; 2) 再对多个波长器件振幅分布进行逻辑“与”操作, 所形成器件同时含有多个波长在焦距 f 聚焦所需的振幅分布信息.

为了验证所提出的设计方法, 本文针对波长 $\lambda_1 = 405 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 632.8 \text{ nm}$ 的径向偏振光进行了大数值孔径 ($\text{NA} = 0.97$) 二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件设计, 并采用数值仿真对其聚焦特性进行了验证, 在 3 个波长入射条件下焦斑位置分别为 25.105λ , 25.106λ 和 25.105λ , 峰值半高全宽分别为 $0.441\lambda_1$ ($0.179 \mu\text{m}$), $0.469\lambda_2$ ($0.249 \mu\text{m}$) 和 $0.427\lambda_3$ ($0.270 \mu\text{m}$), 均小于阿贝衍射极限, 实现了远场超分辨消色差聚焦; 相应旁瓣比率分别为 12.5%, 12.6% 和 14.2%, 均处于一个较低水平. 仿真结果同样显示径向偏振光聚焦焦斑主要由纵向电场分量构成, 且其焦平面上出现相位快速振荡现象, 进一步验证了所提出设计方法在设计远场超分辨消色差聚焦器件的可行性. 在进行大孔径远场超分辨消色差聚焦器件设计时, 可增加同心圆环结构数量, 经过逻辑“与”操作后, 更多振幅调控单元保留下来, 对消色差聚焦起到贡献作用. 此类器件可广泛应用光学聚焦、光学成像和光学显微等领域, 并为相关光学研究领域提供核心聚焦器件; 所提出二值振幅型远场超分辨消色差器件设计方法, 可拓展至其他光学波段. 另外, 由于本文所设计的远场超分辨聚焦器件采用二值振幅调控, 其透过率函数 (0 和 1) 是离散的, 导致此类器件聚焦效率稍低; 如何在实现远场超分辨消色差聚焦的同时, 保证高效率聚焦是此类器件研究的一个重要方向.

感谢西南科技大学尚丽平教授和邓琥教授的讨论.

参考文献

[1] Abbe E 1873 *SPIE Milestone Series* **178** 413

- [2] Brabec T, Krausz F 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 545
- [3] Gruner-Nielsen L, Wandel M, Kristensen P, Jorgensen C, Jorgensen L V, Edvold B, Palsdottir B, Jakobsen D 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 3566
- [4] Gu M, Zheng P L, Hu Z W, Ma S D, Xu F, Pu D L, Wang Q H 2022 *Chin. Phys. B* **31** 74210
- [5] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F 2020 *Nat. Rev. Mater.* **5** 604
- [6] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, Khorasaninejad M, Shi Z, Lee E, Capasso F 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 220
- [7] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, Horie Y, Faraon A 2017 *Optica* **4** 625
- [8] Wang S M, Wu P C, Su V C, Lai Y C, Chu C H, Chen J W, Lu S H, Chen J, Xu B B, Kuan C H, Li T, Zhu S N, Tsai D P 2017 *Nat. Commun.* **8** 187
- [9] Sales T R M, Morris G M 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 1637
- [10] Xu Y S, Singh J, Sheppard C J R, Chen N G 2007 *Opt. Express* **15** 6409
- [11] Huang T J, Liu J Y, Yin L Z, Han F Y, Liu P K 2018 *Opt. Express* **26** 22722
- [12] Yang C, Shen Y, Xie Y Q, Zhou Q, Deng X H, Cao J C 2019 *Phys. Lett. A* **383** 789
- [13] Wang S M, Xu J, Zhong Y, Ren R, Lu Y Q, Wan H D, Wang J, Ding J P 2016 *Opt. Commun.* **372** 245
- [14] Davis B J, Karl W C, Swan A K, Ünlü M S, Goldberg B B 2004 *Opt. Express* **12** 4150
- [15] Berry M V 2016 *J. Phys. A Math. Theor.* **50** 025003
- [16] Berry C W, Wang N, Hashemi M R, Unlu M, Jarrahi M 2013 *Nat. Commun.* **4** 1622
- [17] Berry M V, Dennis M R 2009 *J. Phys. A* **42** 022003
- [18] Berry M V, Popescu S 2006 *J. Phys. A* **39** 6965
- [19] Qian Z H, Tian S N, Zhou W, Wang J W, Guo H M 2022 *Opt. Express* **30** 11203
- [20] Zhuang Z P, Chen R, Fan Z B, Pang X N, Dong J W 2019 *Nanophotonics* **8** 1279
- [21] Kim H, Rogers E T F 2020 *Sci. Rep.* **10** 1328
- [22] Wu Z X, Zhu J X, Zou Y Y, Deng H, Xiong L, Liu Q C, Shang L P 2022 *Opt. Mater.* **123** 111924
- [23] Tang D L, Wang C, Zhao Z, Wang Y, Pu M, Li X, Gao P, Luo X 2015 *Laser Photonics Rev.* **9** 713
- [24] Chen L, Liu J, Zhang X H, Tang D L 2020 *Opt. Lett.* **45** 5772
- [25] Yuan G, Rogers E T F, Zheludev N I 2017 *Light-Sci. Appl.* **6** e17036
- [26] Tang D L, Chen L, Liu J J 2019 *Opt. Express* **27** 12308
- [27] Wu Z X, Deng H, Li X X, Liu Q C, Shang L P 2020 *Appl. Opt.* **59** 7841
- [28] Goodman J 1996 *Introduction to Fourier Optics* (2nd Ed.) (McGrw-Hill Compnaies, Inc)
- [29] Huang K, Ye H, Teng J, Yeo S P, Lukyanchuk B, Qiu C 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** 152
- [30] Malitson I H 1965 *J. Opt. Soc. Am.* **55** 1205
- [31] Rakić A D, Djurišić A B, Elazar J M, Majewski M L 1998 *Appl. Opt.* **37** 5271
- [32] Liang Y Y, Liu H Z, Wang F Q, Meng H Y, Guo J P, Li J F, Wei Z C 2018 *Nanomaterials* **8** 288
- [33] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Commun.* **6** 7069
- [34] Dorn R, Quabis S, Leuchs G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 233901
- [35] Rogers E T F, Zheludev N I 2013 *J. Opt.* **15** 094008

Study on binary-amplitude far-field super-resolution achromatic focusing devices*

Wu Zhi-Xiang^{1)2)†} Li Xin-Yu³⁾ Huang Zi-Wen¹⁾ Zou Yi-Yang¹⁾

Xiong Liang¹⁾ Deng Hu¹⁾²⁾ Shang Li-Ping¹⁾²⁾

1) (School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

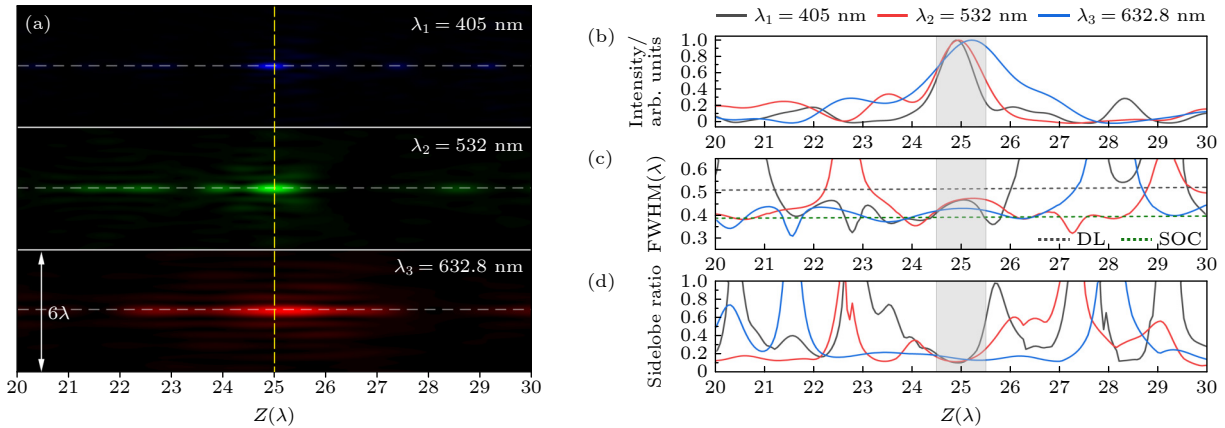
2) (Joint Lab Extreme Condit Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

3) (School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

(Received 26 January 2024; revised manuscript received 26 February 2024)

Abstract

The far-field super-resolution focusing devices possess characteristics such as super-resolution focusing, achromatic, small size and easy machining, which make them highly promising in optical imaging, optical microscopy and lithography. In this work, we propose a binary-amplitude modulation-based method for generating far-field super-resolution achromatic focusing. By using the principles of optical super-oscillation, combined with angular spectral diffraction theory and binary particle swarm optimization (BPSO), we optimize the binary amplitude-type far-field super-resolution focusing devices, which have an identical radius of 100λ but different focal lengths: $\lambda_1 = 405$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm and $\lambda_3 = 632.8$ nm, respectively. Additionally, an achromatic metalens is integrated by using Boolean AND operation. To assess the feasibility of our proposed approach, numerical simulations are conducted via COMSOL Multiphysics employing FEM analysis. The simulation results demonstrate that the generated spots are located at 25.105λ , 25.106λ , and 25.105λ , respectively. The corresponding full width at half maximum (FWHM) values are $0.441\lambda_1$ ($0.179 \mu\text{m}$), $0.469\lambda_2$ ($0.249 \mu\text{m}$) and $0.427\lambda_3$ ($0.270 \mu\text{m}$), which are smaller than the Abbe diffraction limit, and the far-field super-resolution achromatic focusing is realized. The sidelobe ratios are at low levels, i.e. 12.5%, 12.6%, and 14.2%. The binary amplitude-type far-field super-resolution achromatic devices have the advantages of easy machining, achromatism and super-resolution, and are suitable for miniaturization and integration of optical systems.



Keywords: optical superoscillation, achromatic, far-field super-resolution, angular spectral diffraction

PACS: 42.25.-p, 42.79.-e, 07.60.-j, 78.67.Pt

DOI: [10.7498/aps.73.20240176](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240176)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62105271), the Science and Technology Program of Sichuan Province, China (Grant No. 2020YJ0160), the Open Fund Xi'an Institute of Modern Chemical Technology, China (Grant No. SYJJ20210411), and the Natural Science Foundation of Southwest University of Science and Technology, China (Grant No. 19zx7160).

† Corresponding author. E-mail: zxwu@swust.edu.cn

二值振幅型远场超分辨消色差聚焦器件研究

武志翔 李新羽 黄宇文 邹依洋 熊亮 邓琥 尚丽平

Study on binary-amplitude far-field super-resolution achromatic focusing devices

Wu Zhi-Xiang Li Xin-Yu Huang Zi-Wen Zou Yi-Yang Xiong Liang Deng Hu Shang Li-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 104201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240176

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240176>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像

Far-field super-resolution imaging based on wideband stereo-metalens

物理学报. 2018, 67(9): 094101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172608>

基于分形谐振器的远场超分辨率扫描成像

Far-field super-resolution scanning imaging based on fractal resonator

物理学报. 2019, 68(24): 244102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190620>

基于粒子群算法的超振荡超分辨聚焦声场设计

Super-resolution acoustic focusing based on the particle swarm optimization of super-oscillation

物理学报. 2022, 71(20): 204304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220898>

平场复用多焦点结构光照明超分辨显微成像

Flat-field multiplexed multifocal structured illumination super-resolution microscopy

物理学报. 2022, 71(4): 048704 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211712>

角锥棱镜的斜入射远场衍射图样

Far-field diffraction pattern of cube corner retroreflector at oblique incidence

物理学报. 2021, 70(15): 154201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210261>

分孔径离轴同时偏振超分辨率成像光学系统像差校正

Aberration correction of aperture-divided off-axis simultaneous polarization super-resolution imaging optical system

物理学报. 2022, 71(21): 214201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220946>